波纹夹芯梁在爆炸冲击复合加载下的动态力学行为数值模拟

高鹏程[1],金峰[1],李朗[2]

(1. 西安交通大学航天航空学院,710049 西安;2. 西北工业大学力学与土木建筑学院,710072 西安)

摘　要:应用数值方法和一种最新研发的用于模拟带壳装药爆炸中产生的复合加载的复合型子弹,研究复合加载工况下 Weldox 460 E 钢制成的经典轻型抗爆结构——波纹夹芯三明治梁的动态力学行为。研究使用的有限元模型设置与已发表的实验及有限元结果进行对比得到验证。通过对比复合型子弹和平头破片模拟弹(FSP)加载时的弹道极限差异,发现复合型子弹加载工况下波纹夹芯梁的弹道极限比单一破片模拟弹加载时高,并探究了其弹道极限的变化产生的主要原因。通过参数化讨论,研究了加载时间间隔对于靶体弹道极限、靶体后面板跨中位移、针对 FSP 的靶体吸能量等防护关键指标的影响,并总结出加载时间间隔不同导致的各项防护指标的变化规律和机理,为复合型载荷下波纹夹芯三明治梁作为防护结构的设计提供参考。

关键词:复合型子弹;复合加载;波纹夹芯梁;耦合效应

中图分类号:TJ03　　　**文献标志码:**A

A numerical study on dynamic behavior of corrugated core sandwich beam subjected to combined blast and impact loading

GAO Pengcheng[1], JIN Feng[1], LI Lang[2]

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;
2. School of Mechanics Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China)

Abstract: A newly developed composite projectile designed to simulate cased explosive's combined loading and numerical method were implemented to study dynamic behavior of Weldox 460 E steel corrugated core sandwich beam subjected to combined blast and impact loading. Finite element modeling setting was validated based on published experimental and numerical results. By comparing the ballistic limit difference between the composite projectile and the flat-headed fragment simulation projectile (FSP), it is found that the ballistic limit of the corrugated sandwich beam is higher when subjected to the composite projectile than that under the single fragment simulation projectile condition. The main causes of the difference of ballistic limits are also explored. A parametric study was conducted and the influence of loading time interval on the target's ballistic limit, the mid-span displacement of the back face sheet and the energy ab-

收稿日期:2021-04-12　　　**修回日期:**2021-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51528501);国家自然科学基金中德合作研究项目(No. 11761131003);国家自然科学基金委员会中国航天科技集团公司航天先进制造技术研究联合基金(No. U1737107)

通信作者:金峰,教授。E-mail:jinzhao@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:高鹏程,金峰,李朗. 波纹夹芯梁在爆炸冲击复合加载下的动态力学行为数值模拟究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):12-18.
GAO Pengcheng, JIN Feng, LI Lang. A numerical study on dynamic behavior of corrugated core sandwich beam subjected to combined blast and impact loading[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1):12-18.

sorbed from FSP was explored, which provides a reference for the design of corrugated sandwich beam as protective structure under combined blast and impact loading.

Key words: composite projectile; combined loading; corrugated core sandwich beam; synergetic effect

硬化钢材料如 Weldox 460 E 等，经常在防护装甲中被作为原材料使用。这一类型材料虽然比起更先进的轻质复合材料装甲来说具有较高密度，但硬化钢的高比强度、高硬度、高延展性、高承载能力、高可塑性和较高的性价比，使得此种原料仍在弹道防护和带壳装药爆炸防护中有着广泛应用[1-2]。在实际应用中，虽然可以通过设计高厚度的均质钢板来满足工程防护需求，但这种解决方案可能无法满足厚度和重量的设计需求。

在过去的几十年中，如何设计高效的爆炸防护结构，已经引起越来越多研究者的兴趣。轻质、低制造成本和优良的能量吸收性能，是爆炸防护结构设计的主要目标。金属三明治结构具有优秀的抗弯刚度和强度，并且已被证明优于同等质量下的传统均质结构。因此这一类极具竞争力且可靠的结构，已经成为传统结构的有效替代选择[3]。其中，波纹夹芯三明治结构是应用最广泛的金属三明治结构之一，有着满足多功能设计要求的潜质[4]，这一结构已成为各种爆炸防护结构的典型代表之一[5]。

当炸药壳中的装药被引爆，爆炸冲击波和破片共同作用产生的复合毁伤，会对军用以及民用设施造成严重威胁[6-7]。因此针对这一工况开发简便而有效的实验模拟手段是十分必要的。文献[8]开发了一种用金属泡沫子弹来产生高强度压力脉冲的实验方法，该方法被应用于在不使用装药实爆的前提下模拟爆炸产生的冲击波对靶体的加载，如图 1 所示。

文献[9]提出了通过使用一种在前端预置破片的带壳装药来模拟带壳装药爆炸的新型有效的实验方法，这一实验方法极大简化了带壳装药实爆设置繁琐的不足之处。文献[10]提出一种新型的复合子弹，这种新型实验方法将平头破片模拟弹(fragment simulator projectile, FSP)嵌入在一个柱形泡沫铝子弹中，并以此来模拟爆炸冲击波和单个破片冲击产生的复合载荷，但此种方法仅适用于爆炸冲击波先于破片加载的工况。在复合工况中值得注意的是，破片和冲击波的加载间隔对于毁伤效应的影响十分明显。在近爆工况下，通常冲击波会先于破片到达结构表面；而在远爆工况下，通常破片会先于冲击波到达结构表面[11]。

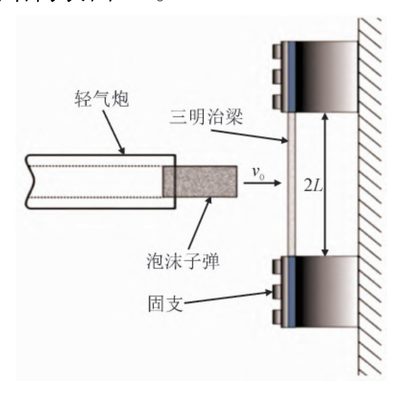


图 1　施加代表爆炸波的脉冲的实验示意图[8]

Fig. 1　A schematic showing the test used to impose an impulse representative of a blast[8]

图 2　250 kg 50% 填充 TNT 当量带壳装药爆炸波和破片到达时间随爆距的变化[11]

Fig. 2　Arrival time of blast and fragments for 250 kg charge filled with 50% TNT[11]

本研究的目的在于探究金属波纹三明治梁，在基于新型复合型子弹模拟的复合载荷下的动力学行为。本文由 5 个主要部分构成。

第一部分对爆炸防护的有效结构、爆炸冲击波或破片侵彻加载下，三明治结构的动力学行为和模拟复合加载方法的关键研究进展分别进行简述。

第二部分建立有限元模型，并进行网格收敛性分析。

在第三部分中，通过采用本研究中的建模方法来仿真文献[12]的实验过程，并与其实验数据和有限元模拟结果中的剩余速度进行对比验证，证明模型的合理性和有效性。

在第四部分中，通过对比复合型子弹和单一平头破片模拟弹(FSP)，分别以相同初始速度和加载间隔加载在波纹夹芯三明治梁上时梁的弹道极限差异。得出复合型子弹加载时，波纹夹芯梁的弹道极

限比单一破片模拟弹加载时高,并通过提取两种工况下靶体梁不同部分吸能的差异,解释了弹道极限产生变化的主要原因,是由于靶体存在应变率强化和应变强化的现象,并导致单一破片模拟弹加载工况较复合弹加载工况下,靶体梁的各组分吸能能力发挥较为不充分。通过参数化讨论,研究加载时间间隔对靶体弹道极限、后面板跨中挠度和针对 FSP 的靶体吸能量这三项关键防护指标的影响。

1 有限元模型

采用文献[10]提出的新型复合型子弹模拟复合加载,其几何构型及参数如图 3 和表 1 所示。作为靶体的波纹夹芯三明治梁的几何构型和几何参数分别如图 4 和表 2 所示。其中:R 为泡沫子弹外径;r_1 为嵌入处内径;r_2 为破片模拟弹外径;Δd 为弹前间距。

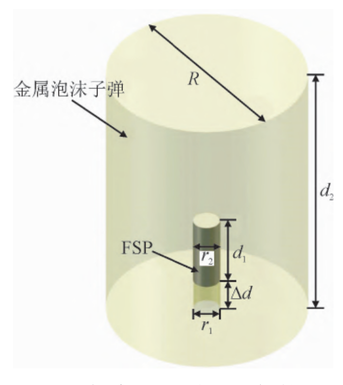


图 3 复合型子弹的几何构型

Fig. 3 Configuration of the composite projectile

表 1 复合型子弹的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of composite projectile

参数	R	d_1	d_2	r_1	r_2
长度/mm	57	20	85	8	7.62

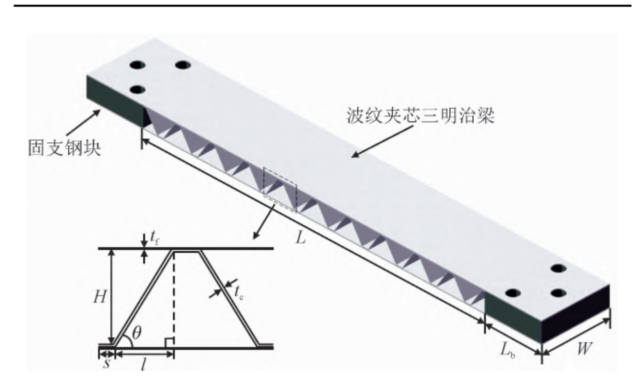


图 4 波纹夹芯三明治梁的几何构型

Fig. 4 Configuration of the corrugated core sandwich beam

表 2 波纹夹芯三明治梁的几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of corrugated sandwich beams

L/mm	W/mm	H/mm	t_f/mm	s/mm	l/mm	θ/(°)	t_c/mm
300	60	17.32	1	2.5	10	60	1

对于靶体两端固支的边界条件,采用对模型边界的单元限制平动和转动的简化策略。由于复合型子弹和作为靶体的波纹夹芯三明治梁,均具有沿 x 轴和 y 轴对称的特性,为了提高有限元模型计算效率,选择建立四分之一有限元模型,对称面处的单元边界施加符合对称条件的相应旋转约束和位移约束,如图 5 所示。

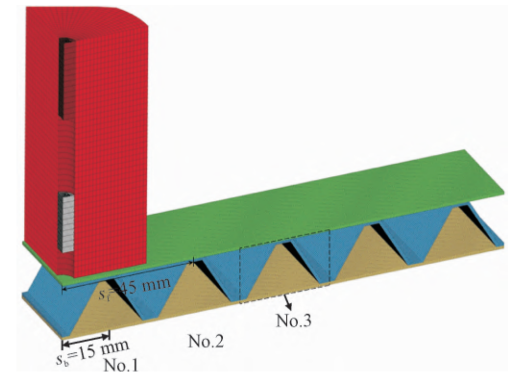


图 5 复合型子弹和波纹夹芯梁的四分之一有限元模型

Fig. 5 The FE model of a quarter target and composite projectile

提取相同初始速度下,平头弹部分冲击不同尺寸有限单元设置下的靶板的后面板跨中挠度,并进行网格收敛性分析,如图 6 所示。由图 6 可知,在不同单元尺寸下计算结果差别较小,计算结果已经收敛。综合考虑计算效率以及计算精度,采用有限单元尺寸为 0.33 mm 较为合理。

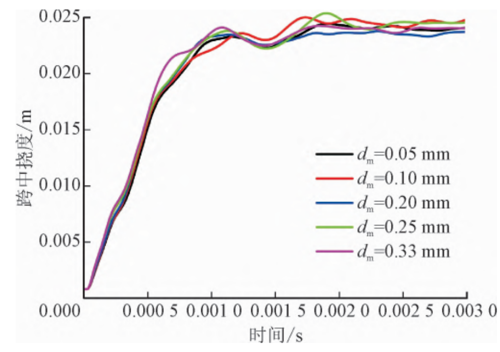


图 6 20 mm 平头弹冲击不同有限单元尺寸的靶体后面板跨中挠度曲线

Fig. 6 Back face mid-span deflection of the 20 mm blunt projectiles impacting the target with different element size

闭孔泡沫铝的准静态正压响应曲线如图 7 所示。数据在恒定应变率 0.006 7 下测得,试样的几何尺寸为长度 50 mm、直径 25 mm。金属泡沫铝在

4.1 MPa 出现应力平台，则其压实应变大约为 $\varepsilon_D=0.54$[10]。

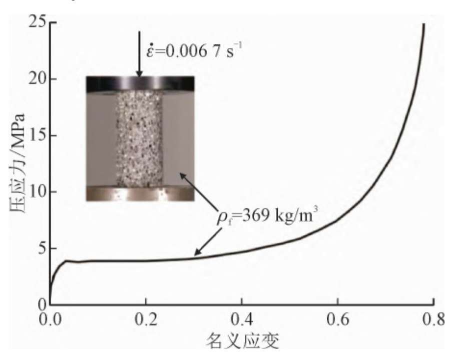


图 7　金属泡沫铝子弹的准静态正压应力-应变曲线[10]

Fig. 7　Quasi-static compressive stress versus strain curve of aluminum foam projectile[10]

根据金属泡沫铝的材料特点，泡沫子弹采用 ANSYS 中的 Crushable foam 材料本构模型，该模型考虑金属泡沫铝由于压实程度变化从而产生的应变敏感特性，具体仿真参数设置如表 3 所示。

1.1　破片模拟弹(FSP)

平头破片模拟弹采用 ANSYS 中 Plastic kinetic 材料本构模型。该模型适用于弹体变形几乎可以忽略不计的工况，具体仿真参数设置如表 4 所示。其中：E 为杨氏模量；ν 为材料的泊松比；ρ 为材料的密度；σ_0 为材料的屈服应力；E_t 为材料的切向模量；ε_f 为材料的平均压实应变。

表 3　金属泡沫铝的材料常数[10]

Tab. 3　Material constants for aluminum foam[10]

E/GPa	ρ/(kg·m^{-3})	ν	LCID	TSC	DAMP
1	378.3	0	图 8	7.1×10^{-3}	0.1

表 4　硬化 Arne 工具钢的材料常数[10]

Tab. 4　Material constants for hardened Arne tool-steel[10]

E/GPa	ν	ρ/(kg·m^{-3})	σ_0/MPa	E_t/MPa	ε_f/%
204	0.33	7 850	1 900	15 000	2.15

1.2　靶体的材料模型

Weldox 460E 靶体波纹三明治梁采用 ANSYS 中的 Modified Johnson-Cook 材料本构模型。仿真材料参数采用文献[12]中的参数，如表 5 所示。

表 5　Weldox 460E 钢的材料常数[12]

Tab. 5　Material constants for Weldox 460E steel[12]

弹性常数和密度			屈服应力和硬化应变			应变率强化		损伤演化
E/GPa	ν	ρ/(kg·m^{-3})	A/MPa	B/MPa	n	$\dot{p}_0$/s^{-1}	c	D_c
200	0.33	7 850	490	807	0.73	5×10^{-4}	0.011 4	0.3

绝热加热和温度软化						断裂应变常数				
C_p/(J·kg^{-1}·K^{-1})	T_m/K	T_0/K	m	α	$\tilde{\alpha}$/K^{-1}	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
452	1 800	293	0.94	0.9	1.1×10^{-5}	−5.038 8	6.619 8	−0.077 4	−0.015	0

2　有限元模型有效性验证

有限元模型设置的有效性通过与文献[21]的实验数据，和应用自行开发的计算模型得出的有限元仿真结果对比验证。在其实验和有限元模型中，厚度为 12 mm 的均质 Weldox 460 E 钢靶板受到直径 10 mm、长度 80 mm 的平头弹冲击加载，冲击初始速度被设定在 175 m/s ~ 600 m/s 之间，共 8 组速度。使用商用有限元软件 ANSYS 建模并使用非线性有限元求解器 LS-DYNA 求解，子弹初始速度与文献[12]中的实验和有限元仿真设置的初始速度相同。

每组不同初始速度下，子弹的剩余速度和靶体弹道极限速度附近子弹的侵彻过程对比如图 8 所示。图 8 中蓝色线和黑色线均为文献结果，红色线为本文有限元模型仿真结果。

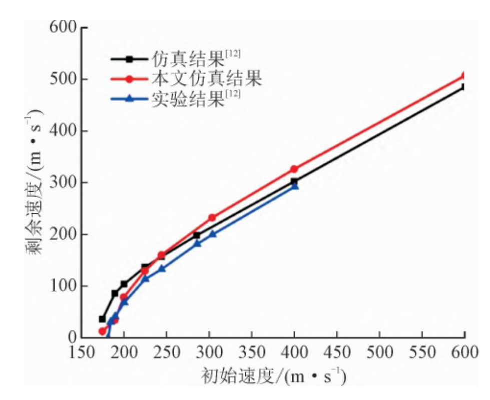


图 8　平头弹冲击 20 mm 厚度钢靶体的剩余速度对比

Fig. 8　Residual velocities of the 20 mm blunt projectiles impacting the steel targets

由于这一动态过程的强非线性和复杂性,以及文献[12]中所使用计算模型和本文计算模型的细节区别,工业中的动力学模拟容许误差一般为10%,而图8中所呈现的误差显然低于这一数值,是可以接受的。有限元仿真结果与实验结果吻合较好,证明了有限元模型的有效性和参数设置以及算法选择的合理性,这些参数设置和所选择的算法将被应用到接下来的讨论研究中。

3 波纹夹心三明治梁在复合加载下的动态力学响应

3.1 复合加载工况对于靶体弹道极限的影响

通过数值计算发现,使用单一FSP和弹前间距为25 mm的复合型子弹,分别加载波纹夹芯三明治梁时靶体、弹道极限结果分别为290 m/s和350 m/s。在复合型子弹所模拟的近爆工况下,复合加载工况下靶体的弹道极限比单一FSP加载工况有明显提升。

通过提取 $V_i = 203$ m/s, $\Delta d = 10$ mm 的复合弹加载工况与相同参数的泡沫子弹和破片模拟弹分别加载工况线性叠加结果,靶体三个组分的总能量变化如图9所示。

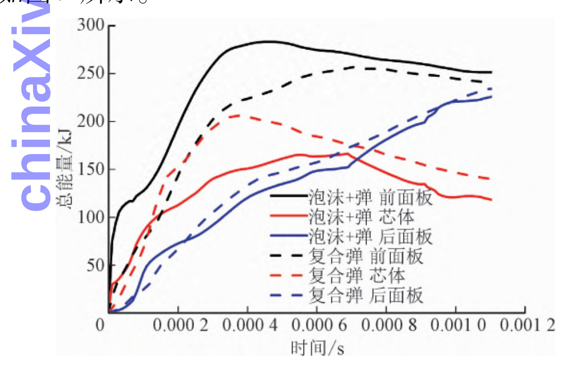


图9 加载过程总能量-时间曲线

Fig. 9 Total energy-time curve during the loading process

从图9中可以看出,复合弹加载靶体时,靶体3个组分吸能较泡沫子弹与平头破片模拟弹分别加载并线性叠加的结果而言相互之间更为接近。说明复合加载的工况下,靶体的芯体以及后面板的吸能能力整体发挥更为充分,并一定程度分担了前面板的吸能量。两种情况下前面板吸能量均为最多,在开始加载后大约0.7 ms时,后面板吸能量开始超过芯体吸能量。其中单独加载的情况下,芯体的总能量在0.7 ms左右开始下降,而复合弹加载情况下,芯体总能量大约在0.35 ms左右开始下降,早于单独加载情况,这一芯体总能量下降的主要原因是因为芯体将能量传递给靶体后面板。两种工况下芯体能量开始下降的时间与前面板总能量达到平台段时间接近,说明芯体开始大量传递给靶体后面板能量时,前面板的吸能功效基本已经停止。

3.2 加载时间间隔对防护指标的影响

在复合型子弹这一实验方法中,爆炸冲击波与破片模拟弹的加载时间间隔 Δt,可以通过设置不同的弹前间距 Δd 来实现。相互之间的关系由位移公式给出,即

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{V_i} \tag{1}$$

其中 V_i 为复合型子弹的初始速度。

3.2.1 弹道极限

图10为不同弹前间距 Δd 下,波纹夹芯三明治梁的弹道极限。由图10可知,不同弹前间距对于靶体波纹夹芯三明治梁的弹道极限有显著影响,这种影响在弹前间距较大时尤为明显。在复合弹模拟的近爆工况下,复合型子弹初始速度不变,弹前间距越大,靶体的弹道极限越高。

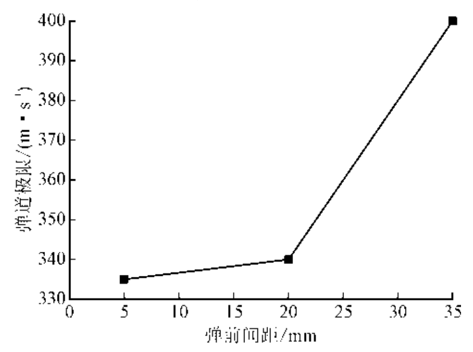


图10 不同弹前间距 Δd 下波纹夹芯三明治梁的弹道极限

Fig. 10 Ballistic limits of corrugated core sandwich beam impacted by composite projectiles with different Δd

根据文献[13]提出的侵彻阻力理论,当撞击速度低于速度阈值 V_{cr},常侵彻阻力假设成立。但当速度超过速度阈值 V_{cr},使侵彻孔洞直径大于弹径时,侵彻阻力必须计入惯性项部分。其中速度阈值 V_{cr} 的表达式为[13]

$$V_{cr} = \sqrt{0.82 \cdot \frac{A}{N^*} \cdot \frac{\sigma_y}{\rho}} \tag{2}$$

其中:A 为量纲为一的靶材常数;N^* 为弹头形状因子;σ_y 为靶材屈服应力;ρ 为靶材密度。对于平头弹而言,$N^* = 1$。代入 Weldox 460 的材料参数可得:$V_{cr} =$

226.24 m/s,因此需要考虑包含材料动强度项和惯性项的动态空腔膨胀模型,根据该模型,侵彻点的阻力(应力)的量纲归一化的一般表达式为[13]

$$\sigma_n = AY + C\sqrt{\rho Y}\cdot V_c + B\rho V_c^2 + D\dot{\rho} d V_c \qquad (3)$$

其中:Y、ρ 分别为靶材的屈服应力和密度;A、B 为量纲为一的靶材常数;而 C 和 D 是另外定义的靶材量纲常数;V_c 为空腔膨胀速度。

根据动态空腔膨胀模型,由于泡沫子弹的预先加载,使得靶体在 FSP 加载时具有一定空腔膨胀速度,且在近爆工况下,由于该空腔膨胀速度持续增长,加载时间间隔越大空腔膨胀速度越高,FSP 受到的侵彻阻力也就越大。因此复合型子弹的弹前间距越大,加载间隔越大,靶体的弹道极限提高越明显。

3.2.2 后面板跨中位移

选取 300 m/s 和 330 m/s 两组速度,此两种速度下 FPS 弹不会穿透波纹夹芯三明治梁的后面板。在两组速度下,用弹前间距分别为 15 mm、20 mm、25 mm、30 mm 的复合弹加载波纹夹芯三明治梁,提取靶体的后面板跨中位移,如图 11 所示。

由图 11 可知,在复合弹模拟的近爆工况下,弹前间距越大,波纹夹芯三明治梁的后面板跨中位移越大。在弹前间距数值较低时,改变弹前间距对靶体后面板跨中位移的影响较弹前间距数值较高时更为明显,而随着复合弹初始速度的上升,改变弹前间距对于靶体后面板位移的影响会减弱。

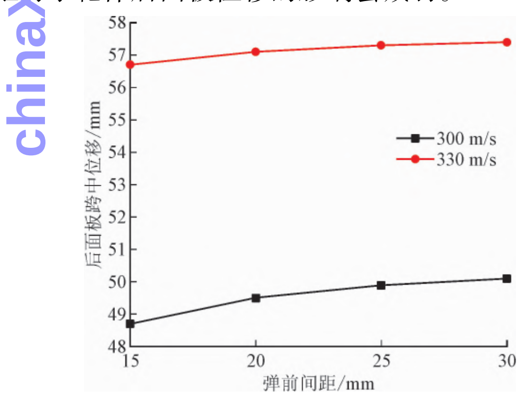


图 11 不同弹前间距下波纹夹芯三明治梁的后面板跨中位移

Fig. 11 Back face mid-span deflection of corrugated core sandwich beam impacted by composite projectiles with different Δd

3.2.3 针对 FSP 的靶体吸能量

根据有限元模拟结果,以初始速度为 400 m/s,弹前间距分别为 5 mm、20 mm、35 mm 的复合型子弹,加载波纹夹芯三明治梁靶体,FSP 的剩余速度分别为 228 m/s、179 m/s、13 m/s。由动能公式可以得出,靶体吸收的 FSP 的动能 E_{ab} 可以表示为

$$E_{ab} = \frac{1}{8}\pi r_1^2 d_1 \rho (V_0^2 - V_r^2) \qquad (4)$$

其中:V_0 为复合型子弹的初始速度;V_r 为 FSP 击穿靶体后的剩余速度。

图 12 为不同弹前间距下波纹夹芯三明治梁针对 FSP 的靶体吸能量。由图 12 可以看出,在弹前间距较大时,靶体吸能能力较弹前间距较低时有较为明显的提升,因此加载间隔的增加不仅会导致靶体弹道极限的显著提升,更会显著增加靶体对于破片的动能吸收能力,使得靶体各个组分的吸能能力发挥得更为充分。

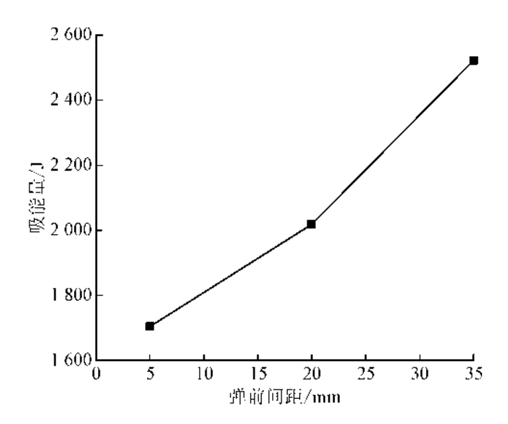


图 12 不同弹前间距下波纹夹芯三明治梁针对 FSP 的靶体吸能量

Fig. 12 Kinetic energy absorbed by corrugated core sandwich beam impacted by composite projectiles with different Δd

4 结 论

1)复合加载工况下靶体的弹道极限比单一 FSP 加载工况有着明显的提升。

2)导致靶体的弹道极限升高的主要原因是靶体应变率强化和应变强化的现象。

3)不同加载间隔对于靶体波纹夹芯三明治梁的弹道极限有着显著的影响,这种影响在加载间隔较大时尤为明显。在复合弹模拟的近爆工况下,复合型子弹初始速度不变,加载间隔越大,靶体的弹道极限越高。

4)在复合弹模拟的近爆工况下,加载间隔越大,波纹夹芯三明治梁的后面板跨中位移越大。在加载间隔较低时,改变加载间隔对靶体后面板跨中位移

的影响较弹前间距数值较高时更为明显，而随着复合弹初始速度的上升，改变加载间隔对于靶体后面板位移的影响会减弱。

5）加载间隔的增加会提升靶体对于破片的动能吸收能力，使得靶体各个组分的吸能能力发挥得更为充分。

参考文献

[1] CHEESEMAN B A, BOGETTI T A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates[J]. Composite structures, 2003, 61(1/2): 161-173.

[2] GAMA B A, BOGETTI T A, FINK B K, et al. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design[J]. Composite structures, 2001, 2(3/4): 381-395.

[3] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Multi-functionality of cellular metal systems[J]. Progress in materials science, 1999, 43(3): 171-221.

[4] LU B H, HAN B, ZHANG Z J. Recent advances in hybrid lattice-cored sandwiches for enhanced multifunctional performance[J]. Extreme mechanics letters, 2017, 10: 58-69.

[5] RUBINO V, DESHPANDE V S, FLECK N A. The dynamic response of clamped rectangular Y-frame and corrugated core sandwich plates[J]. European journal of mechnics and solid, 2009, 28(1): 14-24.

[6] GRISARO H Y, DANCYGIER A N. Characteristics of combined blast and fragment loading[J]. International journal of impact engineering, 2018, 116: 51-64.

[7] NYSTRÖ U, GYLLTOFT K. Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading[J]. International journal of impact engineering, 2009, 36(4): 995-1005.

[8] RADFORD D D, FLECK N A, DESHPANDE V S. The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure[J]. International journal of impact engineering, 2005, 31: 1152-1171.

[9] JIN J, HOU H L, CHEN P Y, et al. Experimental study on the combined damage of liquid cabin structure subjected to charge explosion with preset fragments[J]. International journal of impact engineering, 2019, 130: 19-26.

[10] LI L, ZHANG Q C, ZHANG R, et al. A laboratory experimental technique for simulating combined blast and impact loading[J]. International journal of impact engineering, 2019, 134: 103382.

[11] BØRVIKA T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses[J]. International journal of impact engineering, 2002, 27(1): 37-64.

[12] ROSENBERG Z, DEKEL E. The penetration of rigid long rods-revisited[J]. International journal of impact engineering, 2009, 36(4): 551-564.

（编辑 李坤璐）